



## PROBLEMS OF GEOLOGICAL INTERPRETATION OF SEISMIC-FOCI SYSTEMS OF THE EARTH'S CRUST (GEOMECHANICS AND TECTONOPHYSICAL ANALYSIS)

B.M. Chikov

*Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS, 630090, Novosibirsk, Academician Koptyug Prospect, 3, Russia*

**Abstract:** In our study, an earthquake focus is viewed as a 3D zone of the Earth's crust, wherein the discharge of mechanical loading is accompanied by recordable destruction and qualitative transformation of the geological medium. The purpose of the present publication is to make an attempt to reveal a direct relationship between seismicity and deformation-metamorphic processes which took place in the Earth's crust. Traditional and alternative interpretations of geomechanics of seismic-foci situations are discussed. The problems of geodynamics and geostatics of the seismic-foci systems and their concentrations, as well as anthropogenic models and mechanisms of focus medium structuring are reviewed. The relationship between seismicity and mechanisms of «regional shearing» or formation of crustal deformation-metamorphic structures of lineament type is outlined in the example of the Chuya seismic system of earthquakes which occurred in 2003 and afterwards in the Altai region.

**Keywords:** geomechanics of the Earth's crust, deformation-metamorphic structures, earthquake focus, seismic-foci systems, energetics of seismic-foci systems, geodynamical and geostatical models..

Tectonophysics

Recommended by S.I. Sherman 21 July 2010

*Chikov B.M.* Problems of geological interpretation of seismic-foci systems of the Earth's crust (geomechanics and tectonophysical analysis) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2010. V. 1. № 3. P. 231–248.

## ПРОБЛЕМЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СЕЙСМООЧАГОВЫХ СИСТЕМ ЗЕМНОЙ КОРЫ (ГЕОМЕХАНИКА И ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ)

Б. М. Чиков

*Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. академика Коптюга, 3, Россия*

**Аннотация:** Очаг землетрясения рассматривается как трехмерная область земной коры, в которой разрядка механического нагружения сопровождается фиксируемым разрушением и качественным преобразованием геологической среды. Целью статьи является попытка установить прямую связь сейсмичности и деформационно-метаморфических процессов земной коры. Обсуждаются традиции и альтернативы интерпретации геомеханики

сейсмоочаговых ситуаций. Рассмотрены вопросы геодинамики и геостатики очаговых сейсмосистем и их концентраций, а также техногенные модели и механизмы структурирования очаговой среды. На примере Алтайских землетрясений 2003 и последующих годов намечена связь сейсмичности с механизмами формирования «региональных сдвигов», или линеаментного класса деформационно-метаморфических структур земной коры.

**Ключевые слова:** геомеханика земной коры, деформационно-метаморфические структуры, очаг землетрясения, очаговые сейсмосистемы, энергетика сейсмоочаговых систем, геодинамические и геостатические модели.

## ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения фиксируются практически во всех областях современного горообразования от внутриконтинентальных горных систем до «активных окраин» и внутриокеанского рифтогенеза. Соответственно, сейсмичность считается относительно изученным типом энергопроявлений в земной коре с наиболее полными базами данных пространственных и временных координат, магнитуды, ориентировки напряжений, а также распределения сейсмодислокаций на поверхности. Основные проблемы связаны с отсутствием возможности непосредственного наблюдения следствий «работы» энергии этих событий в недрах. Однако наличие баз данных и косвенные характеристики создают благоприятные предпосылки геологической интерпретации сейсмоочаговых ситуаций.

Известно также, что подавляющая часть гипоцентров коровых землетрясений сосредоточена на глубинах от 7 до 15 км; подобные ситуации очень редко наблюдаются ниже подошвы коры. Сейсмические события нередко сопровождаются катастрофическими следствиями. На поверхности сильные землетрясения проявляются смещениями по разломам, колебаниями грунта, разрушением техногенных сооружений и жилых зданий, поэтому традиции интерпретации сейсмических явлений ориентированы преимущественно на актуальную задачу прогноза события.

Безусловно, прогноз события в связи с катастрофами техногенно-социального плана и анализом сейсмодислокаций на поверхности Земли относится к чрезвычайно актуальным геодинамическим задачам. Но это не исключает задач более общего геомеханического моделирования структуры очаговых сейсмосистем. Эта проблема «гармонической интеграции сейсмологии с геологией и геомеханикой» была сформулирована еще в начале 80-х годов прошедшего столетия в статье «От сейсмологии к геомеханике ...» [Садовский и др., 1983].

В предлагаемой работе проблемы геомеханики очаговых систем рассматриваются в неразрывной связи с основами классической механики, т.е. используются ее основные понятия, принципы и законы. Однако в физическом смысле полного соответствия геомеханики сейсмосистем классической механике не может быть, в связи с тем что механика ориентирована на дискретные тела, их движения и взаимодействия. А в условиях Земли «тела» часто имеют модельный характер с условными границами, и эти качества дополняются термодинамиче-

скими, электромагнитными, механохимическими и другими характеристиками, не входящими в понятия классической механики.

В методическом отношении для удобства анализа вопроса и соблюдения принципа адекватности описания сейсмичности земной коры целесообразно принять иерархическую схему:

**очаг землетрясения** – центральная часть сейсмособытия, для которой диагностируются магнитуда, размеры, тип напряжения и ориентировка деформации;

**очаговая сейсмосистема** – очаг землетрясения и сопутствующая система форшоковых и афтершоковых проявлений в районе гипоцентра основного события;

**сейсмофокальная зона** – региональная кооперативная концентрация повторяющихся сейсмических событий (региональная концентрация сейсмосистем, разобщенных во времени).

Представляется, что сейсмоочаги и сейсмосистемы фиксируют локализацию механизмов экстремального преобразования структуры и минерально-породных характеристик породных масс в соответствующих очаговых геосистемах. Анализ геофизических и региональных геологических характеристик очаговых ситуаций является добротной основой тектонофизического моделирования геомеханики различных типов деформационно-метаморфических структур земной коры, что соответствует главной цели статьи. А к актуальным задачам региональной геомеханики сейсмоочаговых структур относится анализ механизмов формирования и разработка геодинамических и геостатических моделей.

## ТРАДИЦИИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПРИРОДЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Сейсмогенные ситуации в земной коре возникают в режимах «сильного неравновесия», когда производство энтропии существенно превышает производство (выделение) энергии и растут скорости разрыва связей элементов в системе, а процесс разрушения при участии импульсов ударных волн охватывает 3-мерную область [Кузнецов, 1992; Шаров, 1992; и др.]. Эти условия реализуются также в моделях «упругой отдачи» [Reid, 1911] или роста девиаторных напряжений с последующей деструкцией породных масс объема очага [Гольдин, 2005; Ребецкий, 2007]. В таких моделях большинство исследователей основное внимание уделяют повышению напряжений области подготовки землетря-

сения в участках разрыва с последующим образованием деструктивных ситуаций в объеме. В ряде случаев решение позволяет оценить напряженное состояние и направление массопереноса в очаговой области.

В теоретических физических моделях параметры очага соотносятся с условной точкой, для которой диагностируются тип напряжения и ориентировка деформации [Костров, 1975; Соболев, Пономарев, 2003; Mulargia et al., 2004]. Это своего рода краевое решение, как первое приближение к геомеханике очаговой зоны. На основе анализа напряженного состояния и энергетических параметров очагов землетрясений Ю.Л. Ребецкий [2007] показал, что эффективность разгрузки напряжений уменьшается по мере увеличения интенсивности напряженного состояния и максимальна «для разрывов в очаге, близких по ориентации к плоскостям скалывания горных пород, и не зависит от магнитуды землетрясения». Коэффициент эффективности снятия энергии упругой деформации в очаговой области «не зависит от энергетического класса землетрясения и увеличивается по мере приближения поверхностного сцепления к значению внутреннего сцепления горных пород»; с увеличением значений модуля максимальных касательных напряжений «эффективность энергетической разрядки резко понижается» [Там же, с. 313–319].

Геологическая интерпретация сейсмогенных ситуаций традиционно ориентирована на проблему связи очагов землетрясений с разломами. Эта проблема обстоятельно рассмотрена в трудах как отечественных, так и зарубежных исследователей [Соболев, 2002; Трифионов, 1985; Шерман и др., 1983; Шерман и др., 2005; Bezerra et al., 2007; Matsumura, 2006; и др.]. Полагается, что сейсмический процесс генерируется активизацией разломов и что активизация разломов «в чрезвычайно короткий интервал реального времени может быть определяющим фактором при разработке тектонофизической модели сейсмической зоны» [Шерман, 2009, с. 10]. Можно согласиться, что разрывы как деформация растяжения обычно приурочены к рифтовым системам, которые являются следствиями дивергенции глыбовых массивов коры. И эти разрывы совпадают с сейсмоочагами. Иная ситуация наблюдается в областях конвергенции геоблоков и горообразования, где разломы имеют преимущественно сдвиговый характер, и где кинетика геологического структурирования сейсмоочаговых систем далеко не ограничивается вопросами разломообразования.

Внутриконтинентальная сейсмичность областей горообразования – это очевидный результат конвергенции крупных литосферных блоков и коллизии фрагментов земной коры. Конвергенцию сопровождают: рост напряженного состояния коры, горообразование с «хрупкими» деформациями и фрагментацией верхней литосферы на дискретные блоки; коллизионное взаимодействие фрагментов коры с выделением энергии в форме землетрясений «столкновения» и «срыва» [Чиков, 2008]. Можно полагать, что сейсмоочаговые системы в областях горообразования соответствуют последовательным

коллизионным взаимодействиям крупных глыб земной коры. Поэтому формируются не «разломные структуры», а трехмерные зоны взаимодействия геоблоков, в которых разломы занимают определенную позицию и выполняют роль деформационного «сброса» напряжений в области конвергенции глыбовых массивов коры (наряду с другими формами деформаций и движений).

С энергией региональной сейсмичности имеет прямую связь проблема механической энергии регионального и локального структурообразования в земной коре, поэтому геодинамику очаговых структур целесообразно рассматривать на основе общих энергетических принципов с акцентом на механическую энергию.

### ПРОБЛЕМЫ ГЕОДИНАМИКИ И КИНЕТИКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ СЕЙСМООЧАГОВЫХ СИСТЕМ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Представляется, что к числу первоочередных проблем геодинамики и кинетики геологического структурирования сейсмоочаговых систем земной коры относятся: анализ энергетики сейсмосистем; исследование механизмов геологического структурирования зон сейсмичности (механизмы деструкции и механохимической активации, вибрационные эффекты и эффекты Ребиндера, явления повторно-структуро- и минералообразования и т.п.); проблемы техногенного и лабораторного моделирования сейсмических событий.

#### Энергетический потенциал очаговых сейсмосистем

В геодинамических установках принципиальное значение имеет понятие энергии геологической системы как силовой характеристики (свойства) материальной среды. Эта характеристика указывает на: а) возможность совершения работы (потенциальная энергия, энергия массы, внутриатомная кинетическая энергия частиц и др.); б) природу совершаемой работы по механическим перемещениям, химическим, тепловым, электромагнитным или иным взаимодействиям элементов этой среды; в) уже совершенную работу по структурированию среды. Соответственно, энергетический потенциал очаговой геосистемы определяется понятиями: а) *общая энергия* (как совокупность энергопроявлений статических и взаимодействующих элементов геосистемы в условиях более общего внешнего воздействия); б) *эффективная энергия механизмов структурообразования* (в первом приближении эффективная механическая энергия в коре количественно определяется через энергию, распределение и повторяемость землетрясений); в) *плотность энергии* – концентрация в области ее выделения.

В практике сейсмологии энергия землетрясения определяется значением магнитуды ( $M$ ) или энергетического класса ( $K$ ); их соотношение выражается эмпирической зависимостью  $K=4+1.8M$ . Величина высвобождаемой при землетрясении энергии соответствует количеству энергии упругой деформации

среды, накопленной в предочаговую стадию, а соотношение энергии очага и энергии поверхностного проявления землетрясения около 9:1 [Ризниченко, 1985; Стейси, 1972; и др.].

В общем случае энергия очаговых систем землетрясений – это энергия быстрого нарушения равновесия или «разгрузки» напряженно-деформируемого состояния определенного объема земной коры. Основные формы этой «разгрузки»: а) механическая (разрушение, деформации разрыва и изгиба, переупаковка блочных сред, а также колебательные движения); б) электромагнитная (химические реакции минеральных преобразований породных масс); в) излучательная (включая звуковые волны).

Ежегодная интегральная энергия сейсмических событий Земли с магнитудой в интервале  $7.0 \leq M \leq 9.0$  за период 1897–1989 гг. была определена широким диапазоном значений – от  $0.33 \times 10^{24}$  до  $27.8 \times 10^{24}$  эрг; определение энергии проводилось на основе «переходного соотношения»  $\lg E = 1.5 M_{LH} + 4.8$ , где  $M_{LH}$  – максимальная величина отношения амплитуды к периоду поверхностной волны [Котляр, Ким, 1994].

Мониторинг региональной сейсмичности областей внутриконтинентального горообразования дает представление о распределении сейсмоочаговых систем и энергетике тех или иных объемов литосферы. В частности, пример сейсмичности Алтае-Саянской области показывает (рис. 1, а, б), что закономерной особенностью пространственной концентрации эпицентров землетрясений является их узловое и «полосовое» (линейно ориентированное, линейно-цепочечное) распределение при высокой частоте повторяемости событий [Жалковский и др., 1995; Еманов и др., 2005, 2006]. Очевидно также, что с учетом энергии и повторяемости землетрясений в литосферу региона «закачивается» большое количество механической энергии, которая в количественном отношении существенно превышает другие формы энерговыделения и энергопоглощения (по крайней мере, за время регистрации сейсмических событий).

Принимая во внимание то, что во взаимодействиях минеральных масс очаговой области коры количество энергии сохраняется за счет переходов одних ее видов в другие, а необратимая направленность распределения выражается тем, что вместе с эффектами механической трансляции всегда наблюдаются термодинамические и химические эффекты массопереноса, энергетический потенциал очаговой области ( $E_{SS}$ ) земной коры в формализованном виде можно представить перечислением

(суммированием) разновидностей энергии с учетом отношений взаимоперехода одних форм в другие:

$$E_{SS} = E_1 (e_s \odot e_p) \odot E_2 (e_D \odot e_v \odot e_k) \odot E_3,$$

где  $E_1$  – энергия внешнего поля напряжения, включающая энергию регионального стресса ( $e_s$ ), а также литостатического давления и «всестороннего обжатия» ( $e_p$ );  $E_2$  – энергия разрушения и пластической деформации породных масс, включающая собственную энергию деструкции ( $e_D$ ), а также поверхностную энергию частиц ( $e_v$ ) и энергию трения и сцепления ( $e_k$ ), возникающую за счет работы по фронту разрушения;  $E_3$  – энергия минеральных преобразований (химические взаимодействия, рекристаллизация и перекристаллизация минеральных масс очаговой области);  $\odot$  – знак перечисления (суммирования) разновидностей энергии с учетом отношений взаимоперехода механической энергии в тепловую, химическую и другие формы (и наоборот).

Мы еще не умеем количественно определять значения всех разновидностей энергетических характеристик геосистем, но представляется важным выделение (в явном виде) и инвентаризация основных понятий с последующей разработкой физических моделей и, соответственно, с количественными определениями. Исключение «формализма» (как и иного способа описания) будет означать, что проблема не входит в круг наших понятий и не заслуживает обсуждения. А это не является решением самой проблемы, о необходимости разработки которой говорил В.И. Вернадский еще в начале прошлого столетия.

### Техногенные модели и лабораторные эксперименты

Энергия региональной сейсмичности в первом приближении характеризует энергию регионального механического структурирования земной коры. В частных случаях исследование эффектов импульсного воздействия энергии на минеральные среды с соблюдением критериев подобия возможно опытным путем на примерах подземных промышленных взрывов, а также в условиях лабораторного использования взрывных технологий.

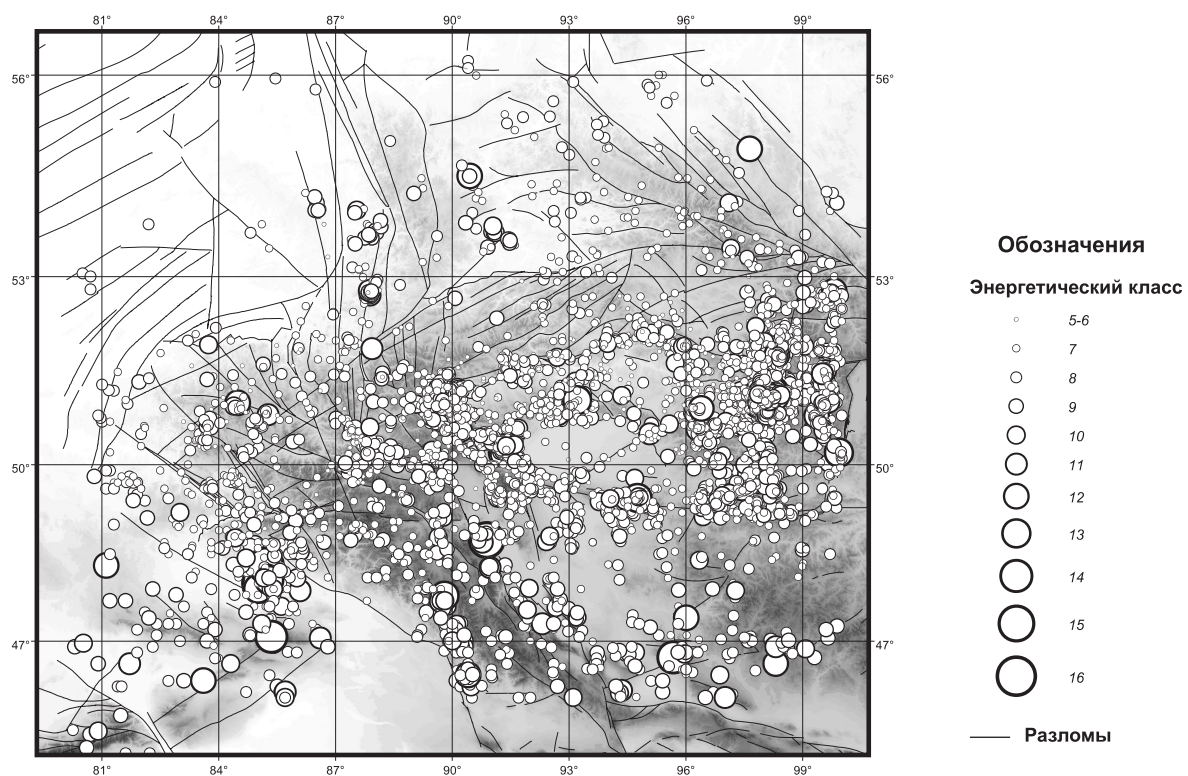
Современные промышленные технологии широко используют концентрированную энергию взрывов для воздействия на природную среду; при этом наряду с практическими целями возможны определения эффектов преобразования структуры породных масс и динамометаморфизма пород. Особенно

**Рис. 1.** Региональная сейсмичность Алтае-Саянской горной области [А.Ф. Еманов и др., 2005, 2006]: а – распределение эпицентров землетрясений за период 1995–2000 гг.; б – повторяемость землетрясений по линии Шапшальский хр. – западное обрамление впадины Убсу-Нур – обрамление Котловины Больших Озер.

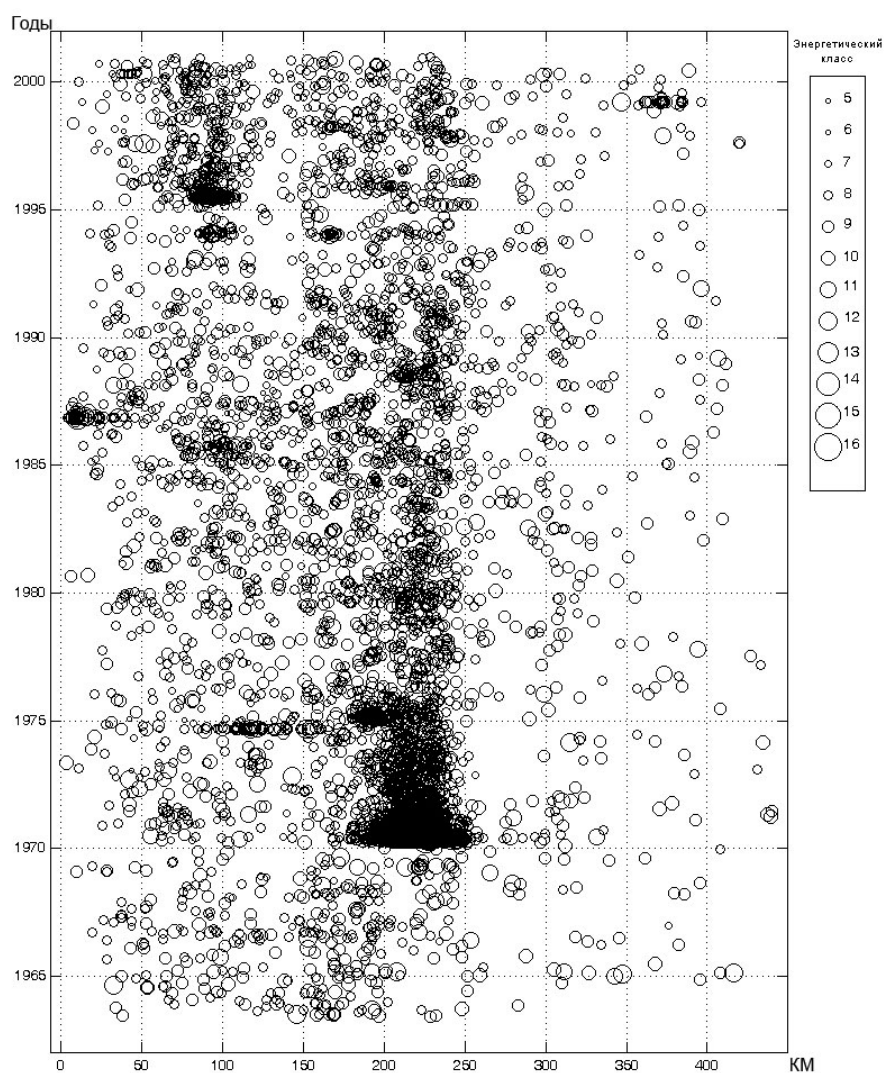
**Fig. 1.** Regional seismicity of the Altai-Sayan mountain region [A.Ф. Еманов и др., 2005, 2006]. а – distribution of earthquake epicentres from 1995 to 2000; б – recurrence of earthquakes on the line from the Shapshalsky ridge to the western border of the Ubsu-Nur basin and the border of the Big Lakes basin.

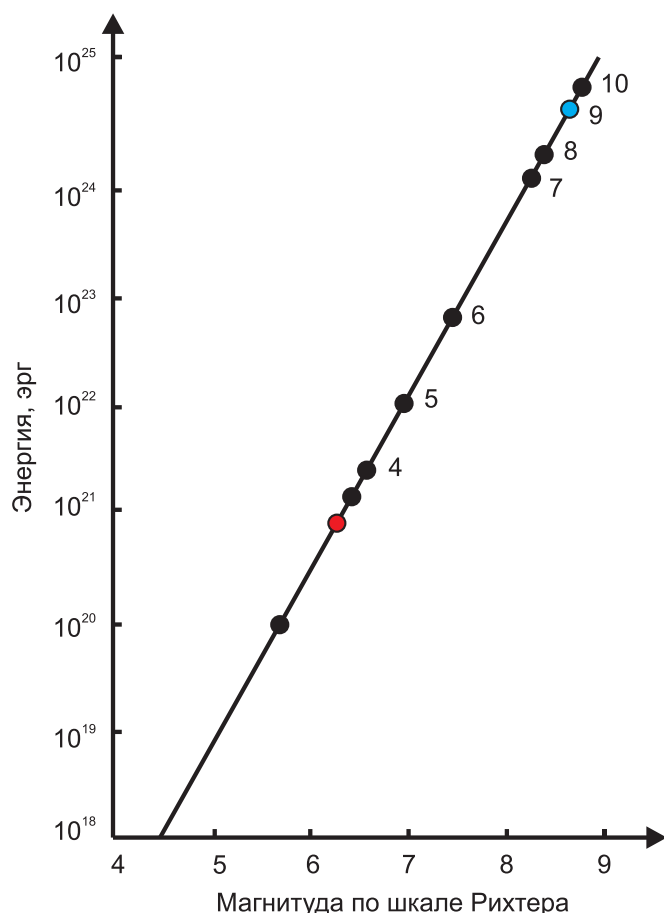


**а**



**б**





**Рис. 2.** Сопоставление энергии природных и техногенных событий [Geer, Shah, 1984]. Землетрясения: 1 – Санта-Барбара, 1978; 3 – Коалинг, 1983; 4 – Сан-Франциско, 1971; 5 – Италия, 1980; 6 – Гватемала, 1976; 7 – Сан-Франциско, 1906; 8 – Аляска, 1964; 10 – сильнейшее, когда-либо зарегистрированное. Взрывы: 2 – атомная бомба; 9 – водородная бомба.

**Fig. 2.** Comparison of energies of natural and technogenic events [Geer, Shah, 1984]. Earthquakes: 1 – Santa Barbara, 1978; 3 – Coaling, 1983; 4 – San Francisco, 1971; 5 – Italy, 1980; 6 – Guatemala, 1976; 7 – San Francisco, 1906; 8 – Alaska, 1964; 10 – strongest, ever-recorded event. Blasts: 2 – A bomb; 9 – H bomb.

показательны в отношении сходства с условиями очагов землетрясений взрывы ядерных зарядов в подземных условиях.

Энергия взрыва ядерных бомб сопоставима с энергией землетрясений (рис. 2). В работе [Садковский и др., 1985] показано, что «не существует принципиальной разницы между взрывными и естественными источниками землетрясений» (с. 1155); авторы также получили вывод о том, что «при землетрясениях и подземных взрывах плотность сейсмической энергии и объемы источников упругих сейсмических волн близки и практически описываются выражением  $\lg EC = \lg VC + 3$ » (с. 1156). Количественно энергия этих событий с  $M=4.0-8.5$  определяется величинами соответственно  $10^{12} - 2.4 \times 10^{17}$  Дж и  $6.3 \times 10^{10} - 3.6 \times 10^{17}$  Дж [Физика..., 1997; и др.]

Численные соотношения энергии землетрясений относительно кратности события с  $M=4$  представ-

ляет следующий ряд: при магнитуде 5.0 вычисленная энергия достигает  $0.063 \times 10^{20}$  эрг – кратно 48; при  $M=6.0$  –  $2.70 \times 10^{20}$  – кратно 2100; при  $M=7.0$  –  $110.0 \times 10^{20}$  – кратно 80500; при  $M=8.0$  –  $3700.0 \times 10^{20}$  – кратно 2800000 [Горшков, 1984; Geer, Shah, 1984]. Этот ряд показывает, что с ростом магнитуды на одно деление выделяемая сейсмическая энергия возрастает соответственно в 35–48 раз. Энергия землетрясения с  $M$  около 8.5 имеют порядок  $10^{24}$  эрг при ее удельной плотности порядка  $10^3$  эрг/м<sup>3</sup>. По оценкам сейсмологов эта энергия превышает суммарную энергию 10 тысяч атомных бомб, подобных сброшенной на Хиросиму; энергия Суматранского события 2004 г. ( $M=9$ ) сопоставима с 6 млн аналогичных атомных бомб.

Техногенной моделью геодинамики единичного сейсмического события может служить очаг ядерного подземного взрыва [Физика..., 1997]. В кратере взрыва начальное ударное давление достигает 1000 Мбар, а температура за фронтом ударной волны – порядка  $10^6$  градусов [Кноулз, Брод, 1981]. При таких параметрах физические процессы и химические реакции протекают за наносекунды ( $10^{-9}$  с). К следствиям такого воздействия относятся локальное плавление породных массивов, образование лешательитов и фазовые превращения кварца с образованием стишовита, коэсита и тридимита. К показательным примерам сейсмогенного «удара» и колебательного последствия относятся подземные ядерные взрывы в Неваде в конце 1968 г. [Гохберг и др., 1988; Bukhnam, 1969]. Сила взрывного удара здесь достигала 1 Мт ( $10^9$  кг ВВ). На поверхности вокруг проекции точки взрыва ( $r=450$  м) наблюдалась интенсивная сложная механическая деформация породных масс. Смещения по ранее известным разрывам были установлены в радиусе более 5.5 км. А колебательное последствие только афтершокового характера (10 тыс. толчков с  $M=1.3-4.2$ ) продолжалось несколько месяцев (!).

Установлено, что эффекты деструкции подземной среды, катаклиз и остеклование пород, как и направленное уменьшение эффектов структурирования с удалением от эпицентров взрывов, не имеют существенных отличий от соответствующих эффектов природных очаговых систем [Гохберг и др., 1988; Choubert, 1977; Stöffler, 1972; и др.].

Пониманию кинетики структурирования и преобразования породных масс в сейсмоочаговых условиях способствуют лабораторные эксперименты, проведенные сотрудниками лаборатории тектонического моделирования Института геологии и геофизики СО АН СССР в последней четверти прошлого столетия. В частности, модель землетрясения «срыва» экспериментально была имитирована на прессовой установке Г.Д. Ушакова «обжатие-стресс». Деформация образцов пород производилась в металлических герметизированных цилиндрах; литостатическое давление на образцы фиксировалось в масляной камере ( $P_v$ ), а ориентированное ( $P_s$ ) – дополнительным усилием поршня [Чиков и др., 1989]. Исходное состояние всестороннего «обжатия» в масляной камере достигало 100 МПа, а  $P_s$  в момент деформации – 290 МПа. На образцах

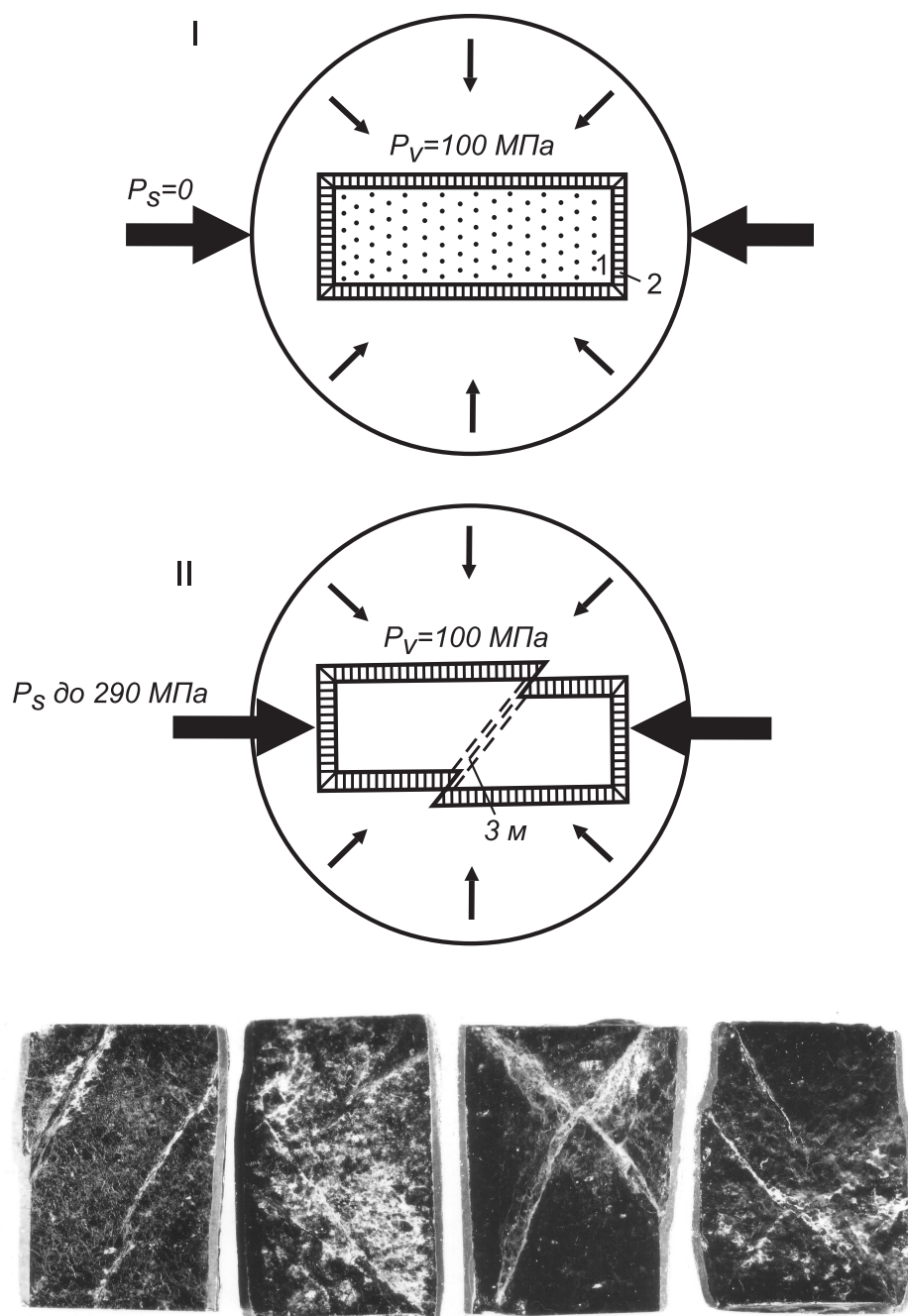


Рис. 3. Прессовая деформация породы в условиях «обжатие–стресс» [Чиков и др., 1989].

Fig. 3. Press deformation of rocks under «compression–stress» [Чиков и др., 1989].

в «очаговых зонах» видны сдвиговые трещины и области объемной деструкции (рис. 3). Прессовая деформация образца с образованием зоны микросдвига (до 1.0–1.5 мм) всегда сопровождалась последующей вибрацией (имитация «землетрясения»).

Характерно, что в зонах экспериментального микросдвига формируется структура, представленная бластомилонитовой массой с включением реликтовых блоков минеральных зерен исходного субстрата. В частности, на основе обезвоженного кристаллического энстатитита в зоне микросдвига

был получен тальковый бластомилонит (рис. 4). За пределами зоны микросдвига видны очаговые участки преобразования энстатитита (светлое), в т.ч. порфиробластического типа (кристаллы талька).

Другая серия экспериментов, имитирующих очаговые условия с поведением ударных волн и вибрации, была проведена во взрывной камере Института гидродинамики СО АН СССР. Использовалась технология объемного воздействия на металлический контейнер цилиндрической формы (l до 12 см, d до 3.0 см), заполненный мелкоблочной минеральной смесью (обкладка гексогеном); ориентирован-





**Рис. 4.** Структура зоны экспериментального микросдвига [Чиков и др., 1989].

**Fig. 4.** Experimental micro-shear zone [Чиков и др., 1989].

ное продвижение «обжатия» регулировалось продвижением взрывного фронта от запала вдоль контейнера [Чиков и др., 1991]. В результате эксперимента в контейнере образуется литифицированный компактит с характерной структурой: в продольном и поперечном сечениях образцов наблюдается осевая зона остеклования минеральной массы («кумулятивная струя»), а вокруг нее – цилиндрические зоны сепарационной полосчатости с концентрацией минеральных зерен различного состава и размерности.

Наиболее интересные примеры связаны с взрывным воздействием на катаклазит гранитного состава (возраст 1.2 млрд лет), зерна которого содержали гематит в акцессорных количествах, а также воздействием на кварц-пиритовую смесь («бразильский порошок»), содержащую редкие мельчайшие зерна Au, «посаженные» на урановый изотоп <sup>195</sup>Au. Результаты импульсного нагружения в первом случае: а) в осевой зоне остеклования образовались модификации кварца (стишовит и тридимит); б) вокруг осевой зоны за счет перераспределения зерен и химических элементов образовались лейкосомные и меланосомные цилиндрические структуры; в) в меланосоме зафиксировано повышенное

содержание Fe («мгновенное» образование «мгносторождения» в масштабе контейнера) (рис. 5). В образце также были установлены перераспределения аргона (увеличение содержаний в слабо преобразованных участках катаклазита и уменьшение с приближением к осевой зоне); отношения модификаций аргона в структурных зонах обнаружили колебания изотопного возраста в диапазоне от 1.2 млрд до 76 млн лет [Меленевский и др., 1991]. Во втором случае [Жмодик и др., 2004] в литифицированном и цилиндрически структурированном компактите были установлены эффекты принудительного перераспределения и зональной концентрации зерен Au с их укрупнением, а также новообразования зерен халькопирита (рис. 6).

Лабораторные эксперименты показывают, что во всех случаях в герметизированном контейнере все преобразования зернистой минеральной массы происходят в течение секунд эксперимента в процессе ударного нагружения (с обжатием) и ориентированного воздействия ударной волны с колебательным последствием. Аналогичные ситуации вполне возможны в сейсмоочаговых ситуациях, как и масштабные структурно-минеральные преобразования в условиях региональной повторяемости со-





**Рис. 5.** Взрывное структурирование мелкоблочного гранитного катаклазита в металлическом контейнере с «мгновенным» образованием «месторождения» (темные полосы слюдиисто-гематитового концентрата) [Чиков и др., 1991].

**Fig. 5.** Blast structuring of the small-blocked granite cataclasite in the steel container with «instant» occurrence of «the deposit» (dark lines are mica-hematite concentrate) [Чиков и др., 1991].

бытий сейсмофокальных зон.

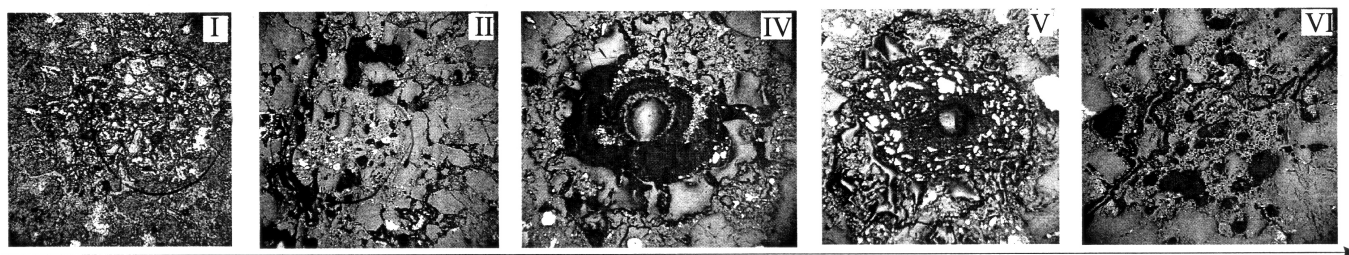
### Механизмы структурирования очаговой среды

Теоретической моделью единичного сейсмического события служит идея формирования очага как системы структурных форм и аккомодационных механизмов в участках концентрации энергии [Гольдин, 2005]. Первым элементом такой системы являются концентраторы роста напряжений в предочаговую стадию; следующий аккомодационный механизм – это «процесс диффузии девиаторной части напряжений в окружающее пространство ... и формирование начальной области влияния очага». При дальнейшем росте напряжений в блочной среде образуются области квазипластичного течения, началом которого служит межзерновая диффузия

дислокаций с последующим межзерновым скольжением («как наиболее эффективный неразрушающий процесс диссипации энергии» [Гольдин, 2005]).

Особенности кинетики геологического структурирования очаговой области заключаются в том, что процесс имеет деструктивно-конструктивный характер – буквально с момента механической деформации и деструкции исходной среды начинается строительство «нового порядка», обеспечивающего равновесие природной системы. Двойственная кинетика преобразования пород геологического субстрата в очагах землетрясений объединяет механизмы разрушения и перераспределения вещества, перекристаллизацию минеральных масс путем твердотельных химических реакций, литификацию материала деструкции и перекристаллизацию механизмами адгезии и спекания с образованием качест-





**Рис. 6.** Ударно-колебательное перераспределение зерен тонкой фракции кварц-пиритовой смеси с  $^{195}\text{Au}$  [Жмодик и др., 2003]. I, II, IV–VI – микрофотографии последовательных срезов по контейнеру; увеличение 1:20; контрастное распределение оптической плотности отражает распределение минеральных неоднородностей (Au, Py, Hpy, Q).

**Fig. 6.** Shock-oscillatory redistribution of fine-fraction grains of the quartz-pyrites mix with  $^{195}\text{Au}$  [Жмодик и др., 2003]. I, II, IV–VI – microfilms of consecutive cross-sections along the container; 1:20 scale; contrasting distribution of optical density shows distribution of mineral inhomogeneity (Au, Py, Hpy, and Q).

венно нового породного комплекса тектонитов [Чиков, 2008].

Изначально к числу природных условий формирования региональной сейсмотектонической структуры относится повторяемость сейсмических событий. Наряду с разнообразными эффектами объемной деформации коры, работой механизмов упрочнения, трещинообразования и перемещения блоковых масс, важнейшим следствием этого «телескопического» процесса является механическое измельчение породного субстрата и формирование громадных масс тектонитов (накопительные эффекты) за миллионы лет сейсмической активности в зонах «региональных сдвигов».

В перечне механизмов и средств геологического структурирования очаговых систем первостепенное значение имеют ударная волна, механизмы деструкции и диспергирования минеральных масс, а также различные формы механохимической активации реакций динамометаморфического минерало- и пороодообразования.

#### *Деструкция породных масс и механохимические эффекты*

Основой кинетики формирования геологической структуры в очаге является уникальный механизм импульсного нарушения равновесия – ударная волна (УВ); она является и главным механизмом формирования сейсмоочаговой ситуации в коре. Это очень кратковременное ( $10^{-3}$ – $10^{-6}$  с) механическое воздействие типа гидродинамического разрыва. УВ центробежно распространяется от условной точки возбуждения, мгновенно активизирует рост микро-разрывов, рост дефектов упаковки кристаллических решеток и инициирует высокоскоростные механические и химические преобразования среды по фронту движения. УВ всегда сопровождается колебательными последствиями, которые распространяются на значительные объемы литосферы пропорционально силе первичного воздействия.

Механические деформации и разрушение породных масс при воздействии ориентированной нагруз-

ки (стресса), превышающей прочность минеральной среды, общеизвестны. В связи с сейсмоочаговыми ситуациями особый интерес вызывают эффекты разрушения при стационарном поле напряжений. В экспериментах хрупкого разрушения образцов пород скорость образования трещин резко меняется, несмотря на действие постоянной нагрузки [Виноградов, 1975]. Также установлен нестационарный характер разрушения образцов пород с резким ростом скорости трещинообразования в локальных участках, которая затем восстанавливается до прежнего уровня; вполне вероятно, что эти локальные объемы «моделируют разрушение некоторой области в «стесненных» условиях, характерных для разрушения в земной коре» [Журков и др., 1980, с. 83]. Это послужило основанием для вывода о том, что при однородном нагружении среды ( $\sigma = \text{const}$ ) возникают условия, типичные для активной нелинейной среды, что приводит к генерации ударных волн и лавинного трещинообразования [Кузнецов, 1992, с. 57].

Наряду с разнообразными эффектами объемной деструкции породных масс, работой механизмов упрочнения, трещинообразования и перемещения блоковых структур, важнейшим следствием этого процесса является механическое измельчение породного субстрата в зонах многократного взаимодействия (подобно дисковой мельнице).

Очевидно, в очаге землетрясения характер и степень преобразования породных масс зависят от энергии разгрузки напряжений, а также от неоднородности и типа упорядоченности строения геологического субстрата. При  $M$  до 5–7 и всестороннем «обжатии» порядка 1.5 кбар в стресс-преобразованиях среды преобладают катакластические механизмы. Экстремальным проявлением механического разрушения следует считать диспергирование (милонитизацию); последующие преобразования механически измельченной среды в очаге связаны с колебательным последствием и эффектами механохимии. Наиболее ярко процесс развития геологической структуры очаговой области земной коры проявляется при сильных землетрясениях ( $M > 8$ ) и

«обжатию» порядка 2.0–2.5 кбар и более; процесс приобретает характер реологического взрыва [Ярославский, 1982]. Процессы метаморфизма породной среды происходят в режиме взрыва с развитием детонации как формы твердотельной химической реакции [Ениколопан, 1988].

Эффекты деструкции породных масс очага и диспергирования пород способствуют механохимической активации реакций метаморфизма, а напряженное состояние – кинетике твердотельных диссипативных процессов течения и фазовых переходов. В области механического измельчения активно проявляется влияние адсорбционно-активных сред [Ребиндер, Шукин, 1972]: резкое снижение прочности, пластифицирование (облегчение пластической деформации) и самопроизвольное диспергирование твердого тела вследствие увеличения энтропии системы (при низких значениях межфазной энергии). В тонкодисперсных средах количество дефектов может достигать  $10^{21}$  дисл/см<sup>3</sup>, что на 8–9 порядков превышает дефектность монокристаллов [Кузнецов, Симкин, 1990]. Соответственно, реакционная способность диспергитов всегда несравненно выше, чем монолитной или грубо брекчированной породы. В диспергитах активно проявляется эффект «флюида деструкции»: при тонком измельчении минеральной среды коэффициенты диффузии растут на 10–15 десятичных порядков по сравнению с теми же показателями без приложения нагрузок, а скорости химических превращений увеличиваются на 3–8 десятичных порядков по сравнению со скоростями подобных реакций в жидкой фазе [Ениколопан и др., 1986].

#### Колебательные эффекты

Преобразование минеральных масс в сейсмоочаговых зонах происходит также и по сценарию многократного вибрационного воздействия на блочно-дисперсную среду; наряду с тонким диспергированием не исключается возникновение различных малых форм сдвигового твердотельного течения (результат дислокационного и диффузионного крипов). Даже акустические колебания выполняют роль «немеханической энергии» в процессах разрушения очаговой среды (механизм кратковременной ползучести). При этом в акустически активной среде «могут также формироваться отдельные ударные волны (солитоны) за счет укручения фронтов этих волн» [Кузнецов, 1992, с. 60]. При повторяющихся критических нагрузках деформационные поверхности (трещины) неравномерно распространяются по всему объему деформируемых минеральных масс, а процессы деформации и разрушения проявляются с накопительным эффектом по принципу «телескопирования».

В период активности сейсмоочага представляют собой мощные колебательные геосистемы [Викулин, 2003], а колебательное последствие крупных сейсмических событий ( $M=6.0$  и более) охватывает многие сотни и тысячи квадратных километров площади сеймотектонической области в течение длительного времени. Вибрация оказывает существенное

влияние на скорость и масштабы перемещения зернистых масс [Резуженко, 1980], особенно в зонах разломов [Псахье и др., 2004; Ружич и др., 2000].

К основным колебательным эффектам геомеханики относятся [Блехман, 1988; Чиков, 2005]:

1. Вибромеханические эффекты направленного массопереноса – медленные перемещения вещества и формирование определенных симметричных отношений упорядоченности в колеблющейся среде; особое значение имеет эффект превращения сухого трения в вязкое, при котором для направленного перемещения масс в условиях земной коры требуется минимальное стрессовое усилие.

2. Виброреологические эффекты: а) ускорение процессов крипа при колебаниях даже относительно небольшой амплитуды (виброползучесть); б) существенное ускорение процесса снижения напряжения в геосистемах (виброрелаксация); в) снижение среднего уровня нагрузки для разрушения породных масс (виброусталость); г) увеличение эффективной вязкости при переходе от ламинарного к турбулентному режиму течения (вибротекучесть) и другие явления.

В условиях вибрации пульсирующее трансляционное скольжение разномасштабных доменов очаговых зон происходит за счет виброреологических эффектов кажущегося преобразования сухого трения в вязкое. Суммарное сдвиговое перемещение масс может быть как однонаправленным (при устойчивой анизотропии трения или структурной асимметрии взаимодействующих сред), так и близким к нулю (при отсутствии анизотропии).

Из характеристик энергии и механизмов преобразования сейсмоочаговой области следует, что очаг землетрясения – это область физики высокой плотности энергии и активной механохимии. Относительно единичного события установлено, что плотность энергии очага уменьшается с удалением от гипоцентра [Викулин, 2003]. Соответственно, уменьшается и эффективность энергии в отношении разрушения породных масс, массопереноса и структурирования очаговой области. Сильное землетрясение соответствует энергетическому воздействию, механическому разрушению и стресс-метаморфизму пород в очаге в объеме многие сотни км<sup>3</sup>. За пределами очага энергия землетрясений проявляется упругими колебаниями, и в геостатических моделях этими следствиями можно пренебречь.

Количество энергии и разновидности энергетических взаимодействий определяют характер упорядоченности строения и физического состояния геологической очаговой структуры, т.е. определяют ее структурный стиль. На основе представлений об энергетическом потенциале и механизмах преобразования породных сред при механическом нагружении формулируется геодинамический принцип структурирования очаговой области: *закономерности в структурной упорядоченности и распределении вещественных неоднородностей очаговых геосистем определяют реальные механизмы массопереноса при реальных затратах энер-*



Рис. 7. Фрагмент поверхности металлической пластины с взрывными структурами течения в области неплотного контакта.

Fig. 7. Steel plate surface fragment with blast structures of flow in the loose contact area.

гии и соблюдение законов ее сохранения и превращения.

Сейсмоочаговая структура формируется как результат импульсного выделения высокой плотности энергии и высокоскоростных процессов деструкции породных масс. В таком смысле очаг землетрясения – это ограниченный объем земной коры, в котором разрядка механического нагружения сопровождается фиксируемым разрушением и минеральным преобразованием геологической среды. После разгрузки напряженного состояния региональное литостатическое давление и всестороннее обжатие (как условие накопления энергии) обеспечивают литификацию диспергированной минеральной среды и закрепление новых особенностей структурной упорядоченности. Эта упорядоченность определяет структурно-равновесное состояние геологии очага и всей сейсмосистемы после землетрясения.

#### ГЕОСТАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СЕЙСМООЧАГОВЫХ СИТУАЦИЙ

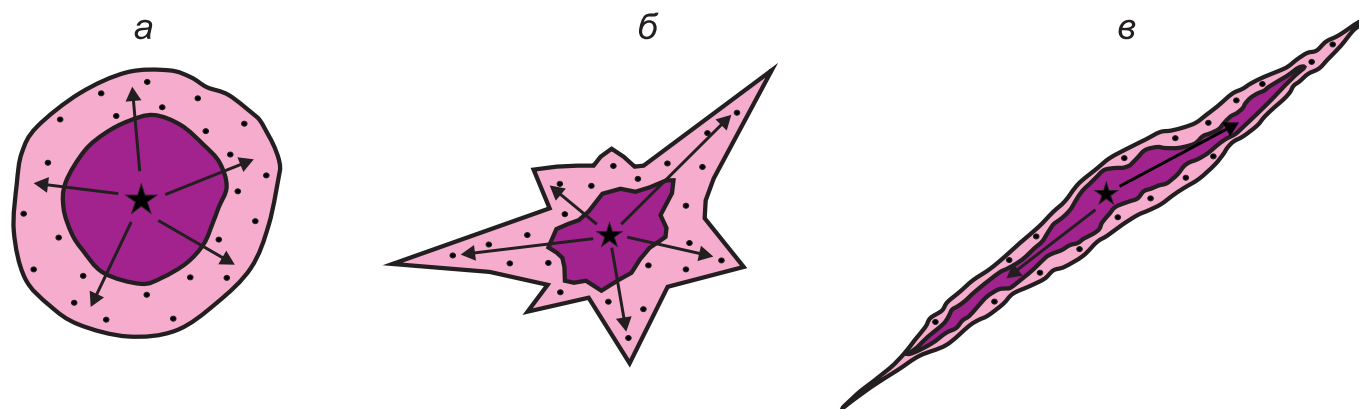
В геологическом отношении геостатические модели сейсмосистем – это материальные системы, имеющие определенную структуру, поэтому одной из главных задач региональной геомеханики сейсмоочаговых ситуаций является разработка их геостатических или структурных моделей с выделением типовых подсистем и регулирующих правил их связей и отношений. Такие модели должны дать

ответ на вопрос о том, какую геологическую работу производит энергия сейсмособытий в недрах. Характеристика геостатических ситуаций включает морфологию сейсмообъекта, его размеры, представления о породных массах и их распределениях, а также упорядоченности распределения структурных элементов (подсистем) очаговой системы.

Характеристика  $M$  позволяет оценить соотношение энергии, выделившейся в очаге, с его размерами. При этом в практической сейсмологии используются уравнения:  $\lg L(\text{км}) = 0.44M - 1.29$  [Ризниченко, 1985] или  $\lg L(\text{км}) = 0.39M - 1.00$  [Викунин, 2003]. С увеличением магнитуды увеличиваются и размеры очаговой структуры. Ранее Н.Д. Жалковский и В.И. Мучная [2000] систематизировали данные о геометрии очагов коровых землетрясений и показали, что в уравнении  $\lg L = aM + b$ , связывающем геометрические размеры области афтершоков ( $L$ ) с магнитудой события ( $M$ ), коэффициенты  $a$  и  $b$  у разных авторов существенно неодинаковы: от  $a = 0.69 - 1.21$  для площади (в  $\text{км}^2$ ) и  $b = 1.53 - 5.05$  для объема гипоцентральной области (в  $\text{км}^3$ ) до  $a = 1.06 - 1.47$  и  $b = 2.78 - 5.42$ . С увеличением энергетического класса события увеличиваются и расхождения в оценках параметров очага в связи с изменением цены деления шкалы магнитуд.

В очаговых системах землетрясений ударные волны распространяются от условной точки возбуждения центробежно, но с разной интенсивностью: в сторону увеличения плотности ударная волна ос-





**Рис. 8.** Схемы движения ударной волны в очаговой зоне землетрясений (принципиальные модели морфологии очага): а – изометричное распространение очаговой ударной волны (ОУВ) в однородной среде (идеализированная ситуация); б – квазиизометрично-лучевое распространение ОУВ в неоднородной среде; в – ориентированное распространение ОУВ при наличии условий канализации энергии («по разлому»).

**Fig. 8.** Shock wave movement in earthquake foci area (conceptual models of the focal morphology). а) Isometric distribution of the focal shock wave (FSW) in the homogeneous medium (ideal scenario); б) Quazi-isometric ray-path distribution of FSW in the heterogeneous medium; в) oriented distribution of FSW in the presence of energy channeling conditions («along the fault»).

лабляется, а в сторону уменьшения – ускоряется и усиливается [Зельдович, Райзер, 1966]. В случаях магистрального разлома энергия канализуется избирательно по деформациям растяжения; пример сварки взрывом показывает, что при наличии зазора между пластинами энергия взрыва и ее работа сосредоточены в области неплотного контакта (рис. 7).

В соответствии с центробежным движением очаговой ударной волны в неоднородной среде и соответствующим характером массопереноса от гипоцентра можно предполагать, что в геологическом структурировании очаговой области должны преобладать радиально-лучистые или анизотропные системы упорядоченности (симметрии) распределения вещественных неоднородностей (рис. 8).

По-видимому, в области сейсмотектонической макроструктуры очага ее внутренние структурные неоднородности целесообразно определять понятием мезоструктуры. Принципиальной предпосылкой разработки мезоструктурных моделей служат условия разрушения твердых сред под нагрузкой, сформулированные В.Е. Паниным [1998]: а) на стадиях, предшествующих разрушению, возникают взаимодействующие участки (полосы) пластического течения и относительно устойчивые (жесткие) домены; б) движение вещества в разрушающихся средах – это комбинация деформаций сдвига (в зонах течения) и вращения доменов, т.е. своего рода проявление турбулентности в твердом теле. В свою очередь, эти мезоструктурные элементы будут включать локальные формы и множество иерархических уровней микроструктур [Панин и др., 1985].

Экспериментально показано (см. выше), что при шоковом нагружении минеральной среды в ограниченном пространстве сейсмоочага по схеме «удар-колебательное последствие» волновые механизмы способствуют образованию структурно упорядо-

ченных систем полосчатости в механически диспергированных средах, оказывают влияние на скорость рекристаллизации и перекристаллизации минеральных зерен в тектонитах, а также на кинетику химических реакций минералообразования в диспергитах деформационных зон; механохимические эффекты вибрации на многие порядки усиливают и ускоряют процессы диффузии и рафинирования минеральных зерен [Ениколопан и др., 1986; Молчанов и др., 1990; и др.].

Распределение напряжений вокруг зацепа (барьера, стопора и т.п.) может иметь весьма сложный характер, а упругая разгрузка очаговой области – сопровождаться формированием деформационно-метаморфических систем с глубокими структурно-вещественными преобразованиями минеральных масс, образованием рассредоточенного множества ориентированных структур течения в ламинарных и турбулентных формах, а также появлением регулярно упорядоченных структур типа субпараллельной полосчатости мелкоблочных тектонитов за счет вибромеханического сепарирования и упорядоченной блочности (на основе физических параметров частиц динамокластитов).

Размеры очаговых сейсмосистем, включающих множество сейсмических явлений разной силы, существенно превосходят размеры единичного очага. Эпицентры очаговых событий и сопутствующих афтершоков обычно обособляются в форме эллипса, длинная ось которого примерно в два раза больше короткой; подобную морфологию имеют и сейсмоочаговые системы в профиле сечения.

Сильное землетрясение эффективно проявляется на расстояниях в многие десятки и сотни километров, и объемы очаговых систем могут измеряться многими тысячами и миллионами км<sup>3</sup>. Например, площади эпицентров крупных сейсмосистем в Курильской островодужной дуге с М 8.3 и 8.1 в го-

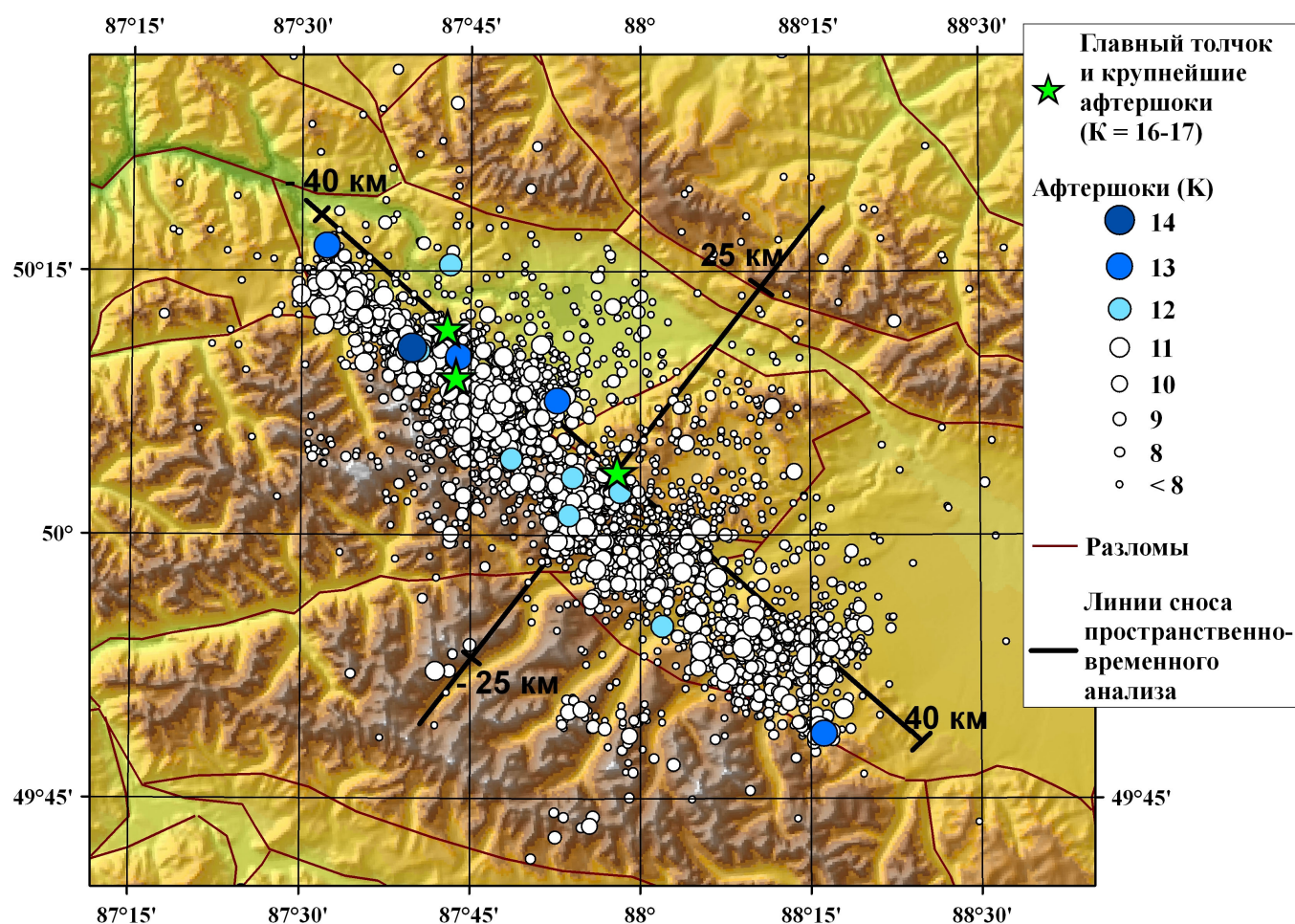


Рис. 9. Чуйская межглыбовая система эпицентров землетрясений и их афтершоков 2004 г. [А.А. Еманов и др., 2005, 2006].

Fig. 9. The Chuya inter-block system of earthquake epicentres and aftershocks which occurred in 2004 [А.А. Еманов и др., 2005, 2006].

ризонгальном сечении определяются порядком  $25 \times 10^3$  и  $7 \times 10^3$  км<sup>2</sup> [Лобковский и др., 2008]. Не менее крупные размеры имели очаговые системы печально известных землетрясений в Чили (1960 г.), близ о. Суматра (2004 г.) и в других регионах.

В объеме коры трехмерные концентрации афтершоков напоминают эллипсоид вращения, ось которого ориентирована по направлению преимущественного движения ударных волн. По-видимому, в таких «эллипсоидах деструкции» земной коры масштабы, степень преобразования и упорядоченности распределения породных масс зависят как от энергии очаговых структур, так и от вещественных неоднородностей и степени упорядоченности строения исходного геологического субстрата.

#### СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИНЕАМЕНТНЫХ ДЕФОРМАЦИОННО-МЕТАМОРФИЧЕСКИХ СТРУКТУР ЗЕМНОЙ КОРЫ

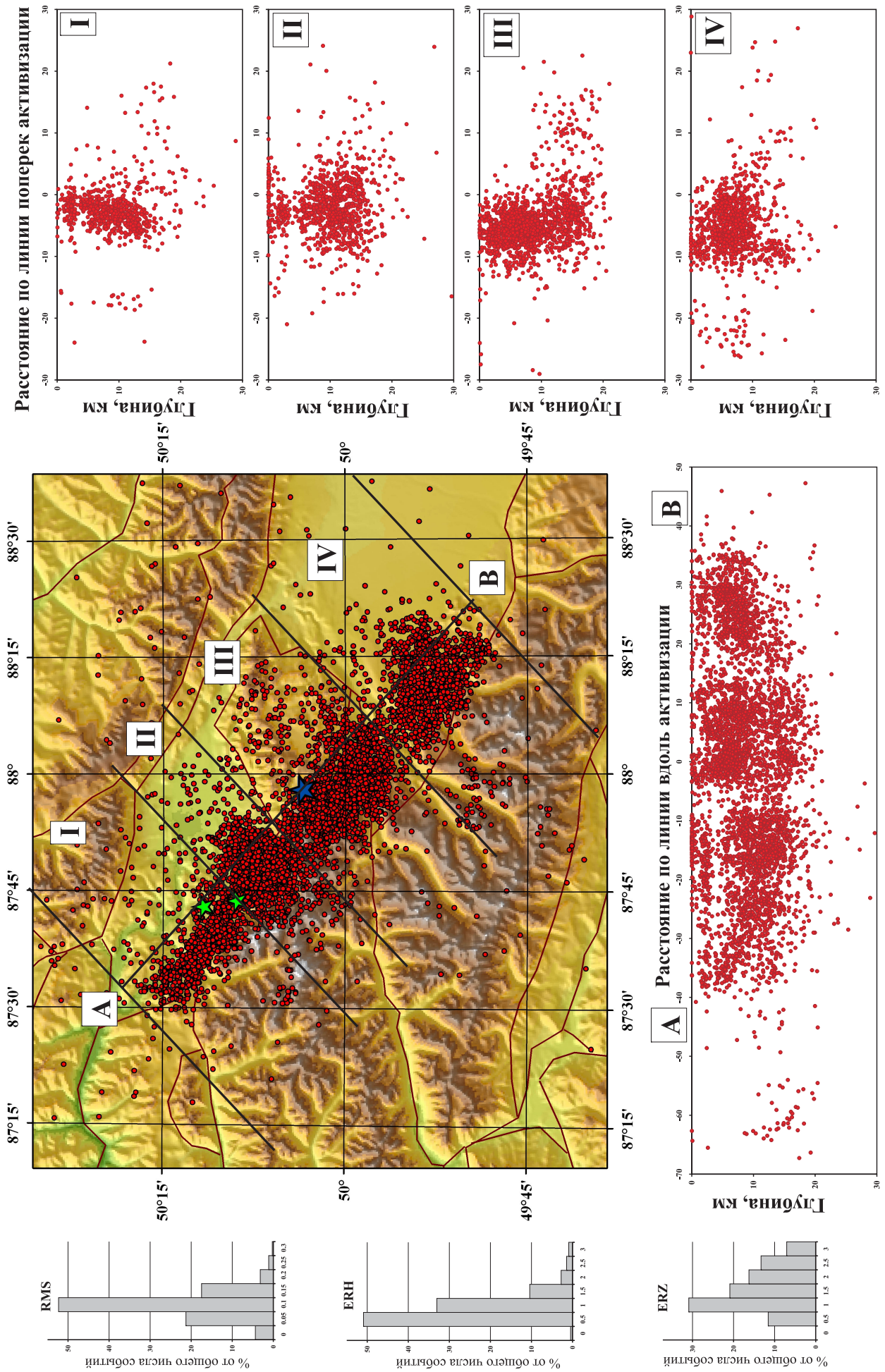
Как уже было отмечено, региональными сеймотектоническими системами являются структуры типа сейсмофокальных зон, имеющих связь с динамикой формирования протяженной фронтальной области коллизионного взаимодействия крупных глыб земной коры. Высокая частота повторяемости событий, рассредоточенных по оси региональной сейсмоструктуры, является следствием многократности такого взаимодействия.

Энергия коллизионного взаимодействия геоблоков циклически унаследованно, но нелинейно реа-

Рис. 10. Трехмерный характер обособления Чуйской сеймотектонической зоны за период 2004–2007 гг. [А.А. Еманов и др., 2009].

Fig. 10. Three-dimensional isolation of the Chuya seismotectonic zone from 2004 to 2007 [А.А. Еманов и др., 2009].





лизуется в виде деформационных и деформационно-метаморфических состояний: а) упругой деформации минеральной среды (напряженно-деформируемое состояние текущего равновесия); б) деформирования среды по разломному принципу (разломообразование); в) механического разрушения в объеме (деструкция с реликтами разломных структур); г) глубокого структурно-вещественного преобразования (деформационно-метаморфическое состояние). Геомеханический анализ позволяет установить связь единичных очагов с условиями формирования тектонических структур типа «региональных сдвигов» (shear zones). Удобным примером анализа условий формирования коллизионных деформационно-метаморфических структур земной коры в связи с сейсмичностью является Алтае-Саянский регион.

После Алтайского землетрясения 2003 г. в регионе получен большой экспериментальный материал по сейсмичности земной коры, позволяющий оптимально представлять морфологию и эволюцию сейсмоочаговых концентраций линейно ориентированного типа. Очевидно, эти данные могут служить основой геологической интерпретации природы сейсмотектонических зон в отношении деформационно-метаморфических структур линеаментного типа. Специалисты Алтае-Саянского филиала Геофизической службы СО РАН показали, что на ограниченном временном интервале сейсмический процесс выражается устойчивыми в пространстве сейсмоструктурами, а наиболее активные из них проявляются в сейсмичности на малых временных интервалах даже по слабым землетрясениям [*Современная геодинамика...*, 2008, с. 177]. К таким зонам отнесены Чуйская, Курайская, Западно-Тоннуольская и ряд других линейно ориентированных сейсмоструктур. Показано также, что с развитием стационарных сетей сейсмостанций (дополняемых временными сетями в периоды активизаций) в тектонически активных регионах появилась возможность создавать современные 3-мерные модели очаговых систем даже в динамике, что их параметры меняются в процессе эволюции регионального сейсмического процесса [А.А. Еманов и др., 2009].

Эталонным примером линейной сейсмофокальной зоны служит Чуйская концентрация сейсмоочагов в области взаимодействия воздымающегося геоблока Северо-Чуйского хребта и погруженных блоков Курайской и Чуйской впадин. Даже в течение первого года коллизионной активизации эта сейсмоструктура была выражена системой афтершоков с оптимальной определенностью (рис. 9). Ее протяженность в различные периоды после 2003 г. колебалась от 50 до 90 км при ширине центральной подзоны высокой плотности эпицентров событий порядка 10 км. Концентрация гипоцентров Чуйской зоны также ориентирована в северо-западном направлении и установлена до глубины 20 км. В первом приближении эта сейсмофокальная зона представляет собой веретенообразное «тело», в котором по интенсивности энерговыведения намечаются устойчивые звенья (рис. 10).

В механизмах формирования подобных сейсмо-

структур большое значение приобретают встречные движения ударных волн от очагов, последовательно возникающих в разных точках сейсмофокальной зоны. При наличии ослабленных деформационных поверхностей сейсмическая энергия канализуется от разновременных очагов между взаимодействующими блоками по концентрациям магистральных разломов (см. выше). Периодически направленные движения энергии и массоперенос меняются в соответствии с положением разновременных центров сейсмических событий, что подтверждается инструментально [Ружич и др., 2000]. В таких условиях даже веерные симметрии упорядоченности структуры разобщенных очагов приобретают свойства анизотропности в соответствии с движением ударных волн; в межочаговых частях преобразование механически измельченной породной среды определяется механизмами сдвигового течения породных масс.

В масштабах геологического времени эти механизмы обеспечивают множественное измельчение породных масс (включая милонитизацию как тонкое диспергирование по типу дисковой мельницы) и формирование ориентированных структур течения по принципу «телескопирования» и накопления структурно-вещественных следствий. Минеральная среда в зонах «пульсирующих сдвигов» качественно преобразуется по принципу «полнокристаллическая порода → катаклазит → милонит → бластомилонит». Объем преобразованных породных масс в единичной структуре «регионального сдвига» может достигать многих миллионов кубических километров.

Учитывая опыт полевых исследований динамометаморфических породных масс, результаты лабораторных экспериментов, а также эффекты механохимической активации минеральных преобразований в условиях концентрированного воздействия механической энергии, можно наметить ожидаемые разновидности породных масс очаговой деструкции: а) катаклазиты с ориентированными структурами сепарации; б) микститы меланжевого типа с ориентированными структурами перемещения обломочного материала; в) сланцы со структурами катакластического течения; г) механокмпозиты (псевдотахилиты, композиты трения, материал подплавления, экзотические мономинеральные концентрации и т.п.) [Зиновьев, Чиков, 2009].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геомеханика сейсмоочаговых структур позволяет установить связь сейсмичности с механизмами формирования обширного класса геологических структур земной коры (независимо от пространственного распределения, масштаба и условий формирования). В геологическом отношении сейсмоочаговые ситуации фиксируют положение и условия формирования иерархии деформационно-метаморфических структур земной коры от единичных очагов динамометаморфизма породных масс до региональных линеаментных систем типа зон смятия,



коллизии швов, «shear zones» и т.п.

Сейсмоочаговые структуры формируются в недрах земной коры, поэтому задачи их геологической интерпретации остаются проблематичными, но актуальными. Представляется, что множественное вскрытие очагов геологического прошлого на поверхность могут обеспечить механизмы денудации: известно, что средние скорости денудации породных масс на поверхности материков варьируются от 5 до 23 см/10<sup>3</sup> лет, что позволяет предположительно оценить глубину денудационного среза для древних щитов порядком 40–45 км, а для складчатых сооружений фанерозоя – до 10–15 км и более [Кукал, 1987]. Следовательно, на денудационном срезе поверхности земной коры какая-то часть палеоочагов доступна непосредственному наблюдению. Однако основная проблема исследования геологии таких сейсмоочаговых структур заключается в том, что метаморфизм их породных масс имеет контрастный характер, диагностика тектонитов разработана недостаточно, а соответствующая информация если и есть, то рассредоточена и завуалирована традиционными процедурами «восстановления первичного состояния» объектов наблюдения.

Количество энергии и разновидности энергетических взаимодействий определяют стиль геостатической структуры сейсмоочаговых систем. Формирование сейсмоочаговых систем земной коры сопровождается качественным преобразованием геологической структуры первичной среды, глубокими структурно-вещественными преобразованиями минеральных масс, образованием множества индикаторных структур течения в ламинарных и турбулентных формах, а также появлением регулярно упорядоченных систем за счет вибромеханического сепарирования, упорядоченной блочной переупаковки и т.п. Эффекты высокоскоростного механохимического преобразования минеральных сред подтверждаются результатами лабораторных экспериментов в условиях «ударных» систем нагружения. В практическом отношении очень важно то, что ударно-вибрационные механизмы зерновой сепарации и сегрегации работают также в случаях перераспределения и концентрации мельчайших рассеянных рудных зерен, обеспечивая их скопления in situ.

## Благодарности

Автор выражает признательность С.В. Зиновьеву, А.А. Еманову и А.Ф. Еманову за конструктивное обсуждение содержания и помощь в подборе иллюстраций.

## ЛИТЕРАТУРА

- Блехман И.И. Что может вибрация? О «вибрационной механике» и вибрационной технике. – М.: Наука, 1988. – 208 с.
- Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КОМ СПГ ГС РАН, 2003. – 150 с.
- Виноградов С.Д. Исследование процессов разрушения образцов в условиях одностороннего сжатия // Физика очага землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 243 с.
- Гольдин С.В. Макро- и мезоструктуры очаговой области землетрясения // Физическая мезомеханика. – 2005. – № 1. – С. 5–14.
- Горшков Г.П. Региональная сейсмоструктура территории юга СССР: Альпийский пояс. – М.: Наука, 1984. – 272 с.
- Гохберг М.Б., Рогожин Е.А., Гусева Т.В. и др. Реакция геологических структур на импульсное воздействие крупных взрывов // Геотектоника. – 1988. – № 5. – С. 3–14.
- Еманов А.А., Лескова Е.В., Еманов А.Ф., Фатеев А.В. Элементы структуры и фазы развития афтершокового процесса Чуйского землетрясения // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 1. – С. 29–36.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В. Пространственно-временные особенности сейсмичности Алтае-Саянской складчатой области // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8, № 1. – С. 49–64.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А. и др. Общее и индивидуальное в развитии афтершоковых процессов крупнейших землетрясений Алтае-Саянской горной области // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9, № 1. – С. 33–43.
- Ениколопан Н.С. Детонация – твердотельная химическая реакция // Доклады АН СССР. – 1988. – Т. 302, № 8. – С. 630–633.
- Ениколопан Н.С., Мхитарян А.А., Карагезян А.С. Сверхбыстрые реакции разложения в твердых телах под давлением // Доклады АН СССР. – 1986. – Т. 288, № 3. – С. 657–660.
- Жалковский Н.Д., Кучай О.А., Мучная В.И. Сейсмичность и некоторые характеристики напряженного состояния земной коры Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. – 1995. – Т. 36, № 10. – С. 20–30.
- Жалковский Н.Д., Мучная В.И. О природе афтершоков и физических процессах в очагах землетрясений // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, № 2. – С. 255–267.
- Жмодик С.М., Верховцева Н.В., Нестеренко В.Ф., Чиков Б.М. и др. Экспериментальное исследование перераспределения золота в процессе ударно-волновой нагрузки пирит-кварцевой смеси (с использованием радионуклида <sup>195</sup>Au) // Геохимия. – 2004. – № 12. – С. 1285–1300.
- Журков С.Н., Кусенко В.С., Петров В.А. и др. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел // Физические процессы в очагах землетрясений. – М.: Наука, 1980. – 282 с.
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966. – 686 с.
- Зиновьев С.В., Чиков Б.М. К проблеме тектоники деформационно-метаморфических структур (на примере зон смятия Рудного Алтая) // Доклады АН. – 2009. – Т. 426, № 1. – С. 71–75.
- Кноулз К., Броуд Г. Теория процессов кратерообразования (обзор) // Удар, взрыв и разрушение. – М.: Мир, 1981. – С. 8–42.
- Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 167 с.
- Котляр П.Е., Ким В.И. Положение полюса и сейсмическая активность Земли. – Новосибирск: Изд-во ОИГГМ СО РАН, 1994. – 123 с.
- Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений. – Новосибирск: Наука, 1992. – 92 с.
- Кузнецов О.Л., Симкин Э.М. Преобразование и взаимодействие геофизических полей в литосфере. – М.: Недра, 1990. – 269 с.
- Кукал З. Скорость геологических процессов. – М.: Мир, 1987. – 246 с.
- Лобковский Л.И., Куликов Е.А., Рабинович А.Б. и др. Землетрясения и цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. в районе Центральных Курил: оправданный прогноз // Доклады АН. – 2008. – Т. 418, № 6. – С. 829–833.
- Меленевский В.Н., Соловьев А.Н., Травин А.В. Стрессовое воздействие на К/Аг-систему гранита по данным экспериментальных исследований // Доклады АН СССР. – 1991. – Т. 318, № 5. – С. 1220–1223.
- Молчанов В.И., Селезнева О.Г., Осипов С.Л. Механоактивация минерального вещества как предпосылка стресс-преобразований в линейментных зонах // Структура линейментных зон стресс-метаморфизма. – Новосибирск: Наука. СО, 1990. – С. 89–97.
- Панин В.Е. Основы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. – 1998. – Т. 1, № 1. – С. 5–22.
- Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.Б. Структурные уровни деформации твердых тел. – Новосибирск: Наука, 1985. – 229 с.
- Псахье С.Г., Ружич В.В., Шилько Е.В. и др. Изучение влияния

- водонасыщения и вибраций на режим смещений в зонах разломов // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7, № 1. – С. 23–30.
- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 406 с.
- Рейндер П.А., Щукин Е.Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения // Успехи физических наук. – 1972. – Т. 108, № 1. – С. 3–42.
- Резуженко А.Ф. О деформировании сыпучей среды // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1980. – № 3. – С. 3–16; № 6. – С. 8–16.
- Ризниченко Ю.В. Избранные труды. Проблемы сейсмологии. – М.: Наука, 1985. – 408 с.
- Ружич В.В., Псахье С.Г., Борняков С.А. и др. Изучение влияния виброимпульсных воздействий на режим смещения в зонах сейсмоактивных разломов // Физическая мезомеханика. – 2000. – Т. 6, № 1. – С. 41–53.
- Садковский М.А., Кедров О.К., Пасечник И.П. О сейсмической энергии и объеме очагов при коровых землетрясениях и подземных взрывах // Доклады АН СССР. – 1985. – Т. 263, № 5. – С. 1153–1156.
- Садковский М.А., Писаренко В.Ф., Родионов В.Н. От сейсмологии к геомеханике. О модели геологической среды // Вестник АН СССР. – 1983. – № 1. – С. 82–88.
- Соболев Г.А. Динамика разрывообразования и сейсмичность // Тектонофизика сегодня. – М.: ОИФЗ РАН, 2002. – С. 67–78.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука, 2003. – 270 с.
- Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования / Ред. М.Л. Новопашин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 449 с.
- Стейси Ф. Физика Земли. – М.: Мир, 1972. – 342 с.
- Трифонов В.Г. Особенности развития активных разломов // Геотектоника. – 1985. – № 2. – С. 16–26.
- Физика ядерного взрыва. – М.: Наука, 1997. Т. 1. – 528 с.
- Чиков Б.М. Сдвиговое стресс-структурообразование в литосфере: разновидности, механизмы, условия (обзор проблемы) // Геология и геофизика. – 1992. – № 9. – С. 3–39.
- Чиков Б.М. Короткопериодные колебания в геологических процессах литосферы (обзор проблемы) // Литосфера. – 2005. – № 2. – С. 3–20.
- Чиков Б.М. Очаг землетрясения как деформационно-метаморфическая структура земной коры // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. – М.: ИФЗ РАН, 2008. Т. II. – С. 94–96.
- Чиков Б.М., Каргаполов С.А., Ушаков Г.Д. Экспериментальное стресс-преобразование пироксенита // Геология и геофизика. – 1989. – № 6. – С. 75–80.
- Чиков Б.М., Пятин С.А., Соловьев А.Н. Импульсное компактирование гранитного катаклазита. Препринт. – Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1991. – 18 с.
- Шаров В.И. Тектоническое землетрясение как неравновесный термодинамический процесс разрушения горных пород (к проблеме смены парадигмы сейсмологии) // Физика Земли. – 1992. – № 5. – С. 121–127.
- Шерман С.И. Тектонофизическая модель сейсмической зоны: опыт разработки на примере Байкальской рифтовой системы // Физика Земли. – 2009. – № 11. – С. 8–21.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов. – Новосибирск: Наука. СО, 1983. – 101 с.
- Шерман С.И., Сорокин С.А., Савитский В.А. Новые методы классификации сейсмоактивных разломов литосферы по индексу сейсмичности // Доклады АН. – 2005. – Т. 401, № 3. – С. 395–398.
- Ярославский М.А. Реологический взрыв. – М.: Наука, 1982. – 193 с.
- Bezerra F.H.R., Takeya M.K., Sousa M.O.L., Anderson F.N. Coseismic reactivation of the Samambaia fault, Brazil // Tectonophysics. – 2007. – V. 430. – P. 27–39.
- Bukhnam R.G. Geologic effects of the BENHAM of the underground nuclear explosion, Nevada Test Site // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1969. – V. 59, № 6. – P. 2209–2220.
- Choubert G. Sur less reaction provoques par la chute greandos meteorites // Notes Serv. geol. – Maroc, Rabat, 1977. Т. 38. – P. 37–117.
- Geer J.M., Shah H.C. Terra non firma. Understanding and preparing for earthquakes. – New York: W.H. Freeman and Company, 1984. – 220 p.
- Matsumura Sh. Seismic activity changes progressing simultaneously with slow-slip in the Tokai area // Tectonophysics. – 2006. – V. 417. – P. 5–15.
- Mulargia F., Castellaro S., Ciccotti V. Earthquakes as three stage processes // Geophysical Journal International. – 2004. – V. 158. – P. 98–108.
- Reid H.F. The elastic-rebound theory of earthquakes // Univ. California. Publ. Geol. Sci. – 1911. – V. 6. – P. 413–444.
- Stöffler D. Deformation and transformation of rock-forming minerals by natural and experimental shock processes. I. Behavior of minerals under shock compression // Fortschr. Mineral. – 1972. – V. 49. – P. 50–113.



**Чиков Борис Маркович**, докт. геол.-мин. наук, профессор, г.н.с.  
Институт геологии и минералогии СО РАН  
630090, Новосибирск, просп. академика Коптюга, 3, Россия  
Тел. (383)3304501; e-mail: chikov@uiggm.nsc.ru



**Chikov Boris M.**, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Chief Researcher  
Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS  
630090, Novosibirsk, Academician Koptyug Prospect, 3, Russia  
Tel. (383)3304501; e-mail: chikov@uiggm.nsc.ru